輻射光譜遙測在作物生產上之多元應用

以水稻為例介紹

國立中興大學 許惇惠
農試所作物組 楊純明

一、前言

作物生產過程中將會受到許多環境因子的影響，除了依照「適地適時適作」的原則，在適當的地點與時機選擇合適的作物種植之外，針對環境狀況採取的因應栽培管理也非常重要。因此，對於作物生長與環境狀態的追蹤和監測，乃作物生育期間基本工作，藉以隨時調整管理措施維持作物的常態生長。

田間取樣調查係傳統採行的監測方法，無論作物或土壤，經由樣本(品)的分析和統計即可瞭解作物與環境的現行狀態(況)，再據此給予對應的管理措施提供有利的生長條件或舒解不利的逆境壓力。這樣的監測方法固然簡易可行，卻甚為費力耗時，也不適用於人跡罕至或不易抵達的偏遠地區，對於集團栽培的大面積農地更可能曠日廢時。自從現代化遙感探測技術發展以來，即受到各產業界的重視，莫不積極地構思於產業運轉流程上的利用。更遑論需要上山、下海、飛天、鑽地的國防軍事、國土規劃、資源開發、太空探索及災害勘測等領域，遙測技術都是最佳的執行工具。先進國家也廣泛的利用遙測技術於農業生產，在農、林、漁、牧各方面處處可見遙測元素的靈活運用。國內的農業生產相對而言較少採用遙測技術，未能充分利用此一物理性感測技術的優點，殊屬可惜。有鑑於此本文乃特別介紹輻射光譜遙測在水稻上的多元應用為例說明，期以助於遙測技術在國內的深根發展與應用。

通訊作者：楊純明研究員
連絡電話：04-23317117

二、何謂輻射光譜遙測

依目前定義，自然界中的一切物質只要其溫度高於絕對零度(-273℃)者，就具有溫度與熱能。因為具有溫熱物質的原子結構會不停的振動、躍遷，並以電磁能或光束粒子(光輻射)的形式向外釋放出輻射能量，能夠釋放出輻射能量的該物體被稱為電磁能源或輻射體。太陽係距離地球最近的自然界中最大的輻射體，也是溫度最高的自然輻射體(表面溫度高達攝氏6,000度)，釋放出的光輻射是農業生產最大與最主要的能量來源。不管是自然或人工的輻射體，其輻射波長可能以下三種型式之一釋放：(1)連續性

波長的寬波段輻射、(2)連續性波長的窄波段或單一波段輻射、或(3)單一波長的輻射。除了黑體(black body)之外，一般的灰體(grey body)均可反射入射的光輻射，而當入射光輻射強度遠大於灰體自身放射輻射的強度時，反射光譜的強度可能覆蓋微弱的放射光譜。

生於英國蘇格蘭愛丁堡的科學家馬克斯威爾(James Clerk Maxwell,1831～1879)於1865年發表了著名的「電磁輻射(或稱為電磁波)」理論，認為震盪的電荷與變化的電流會產生電磁波，而電磁波的傳遞速度約等同於真空中的光速(3×108m sec^{-1})，因此光輻射是電磁波的一種。隨後的科學研究又發現電磁能光譜(輻射光譜)具有一些重要特徵，而發展出光波模式(wave model)及光子模式(particle model)來解釋，即光輻射同時具有波長及光子兩種特性。任一波長光子均帶有特定的振動頻率及能量，因此所謂「光譜」即是輻射波長與光輻射能之關係曲線，能量(溫度)愈高之輻射體(光源輻)，其涵蓋之光譜就愈寬廣。自然界中測得之輻射光譜的波長(或頻率)由短波長至長波長包含宇宙射線、γ射線、x射線、紫外線、可見光、紅外線、微波、無線電波等輻射線類別，而人類眼睛所能看見的部分為‘可見光’，僅佔輻射光譜的一小部分。

農作物植被或稱植冠，可以放射光輻射，也可以反射入射光輻射。其中的反射光譜常被利用來判斷作物的生長狀態，並以評估環境的效應。作物植被反射光譜當中的350～2500nm範圍，最常被人們利用與量測分析的波段。研究人員進一步將之切劃成紫外光(UV,350～400nm)、紫光(V,400～425nm)、藍光(B,425～490nm)、綠光(G,490～560nm)、黃光(Y,560～585nm)、橘光(O,585～640nm)、紅光(R,640～740nm)、近紅外光(NIR,740～1300nm)、短波紅外光(SWIR,1300～1800nm)及中波紅外光(MIR,1800～2500nm)等十個波段。光輻射感測器依使用目的而有不同的設計，寬頻譜波長感測器以數十或數百奈米(nanometer；nm,10-9m)為量測單位，高頻譜波長感測器則以奈米為量測單位，具有高解析光譜的能力。

前述輻射光譜定義，簡單的說就是光譜範圍中各個波長對應其特定輻射強度的變化曲線。典型綠色植被的反射輻射光譜(350～2500nm範圍)為一多重高低起伏的曲線，大致以紫外光波段(< 8%)及可見光波段的反射比較低(< 15%)，近紅外光波段的反射比較高(> 16%)，而在短波紅外光波段(< 35%)及中紅外光波段(< 25%)內的變動落差較大。而且植被光譜曲線不僅隨著生育進展變異，亦因環境因素而有明顯異動，不同的波段之間又會有很大差距，光譜的高低波動十分的複雜。

高能紫外光波段絕大部分穿透植被或被吸收，反射比甚低；可見光波段多被植體色素吸收，將光能利用於光合作用，反射比亦低；相對低能的近紅外光波段，因為植體內部構造與植株間幾何結構關係，大部分被反射而有較高反射比，細胞膨壓、組織活力及植被覆蓋比例越大則反射比就愈高；更低能的短波紅外光、中紅外光波段，則和植被外觀形態及植體水分含量密切相關，低水分含量者有較高反射比，形態高張富含水分者有較低反射比。純由植被光譜曲線的波型，有經驗者已可初步判斷植被與植株的大致生長狀態，尤其當逆境或災害造成作物傷害時光譜曲線波型改變更是顯著。反過來說，欲以光譜波段之間的變化解釋作物的生長狀態，則必須

作
物
生
理

充分瞭解各波段變動與植株生理生化代謝、外部物理徵狀的關係。

三、輻射光譜遙測載台

作物植被的反射輻射光譜係以光輻射感測器即輻射計(radiometer)量測之，更精確的說應該是輻射分光感測器(或稱輻射分光光譜儀，spectroradiometer)，將所量測的光輻射依波長逐一量測其輻射強度。量測時為了減少光線受到干擾及提高測值的準確度，多將感測器置於植被垂直上方偵測，然尺度越高則大氣干擾愈嚴重需另行大氣校正。另考量入射光角度及入射光輻射隨時空導致的差異，通常會進行輻射與幾何校正，尤以中高尺度遙測載台更有其必要。這又牽涉到遙測資料的取得方式，大致可概分為：(1)低尺度的地面或近地面觀測載台；(2)中尺度的飛行器航空觀測載台；以及(3)高尺度的太空觀測載台等三大類，即將感測儀器安裝(附掛)於不同尺(高)度的載台上。後者如衛星、太空梭及太空站等的觀測皆是，但是相對的需要一套複雜的校正程序以還原正確的光輻射測值。完整輻射光譜遙測系統可將遙測取得的輻射光譜資料經適當的資料轉換、分析、統計與歸納等步驟，篩檢出被測物件之特定光譜特徵或組合成特徵光譜模式(組)，來辨識、判斷與區別作物植被表面特性，進而評估作物或環境的面貌和狀態。具有即時、快速、非破壞、大面積偵測等優點的輻射光譜遙測技術，在農業上可被用來建立作物植被光譜資料庫及作業模組，廣泛利用於諸如生育追蹤、營養狀況分析、產量估測與預測、逆境與災損估量、病蟲害感染評估…等多元應用層面，達到促進(或穩定)作物生長和改善生產環境等目的(標)。

四、輻射光譜遙測在水稻生產上的多元應用

水稻族群的植被反射光譜不分期作或年度，均呈現一般綠色植物的光譜曲線模型，除了生育進展外，逆境、災害及病蟲危害等情境將使光譜曲線出現極大變異。通常針對生產過程的某一特定生長階段或特殊目的之應用，必先獲取相關的光譜資料，並建立對應外觀物理徵狀與其光譜特徵的關係模式(組)。為獲得準確的估測，此一程序首先多在地面或近地面遙測載台進行，所建立的光譜特徵模式(組)即所謂地真模式(組)。其後則將實際作業的遙測載台資料和地真模式(組)進行立體遙測資料的串連、整理、校驗、修正等步驟，以建立實用的光譜遙測模式(組)。

為了將光譜遙測技術應用於更大範圍的面積，以充分發揮光譜遙測的經濟效益，中尺度的飛行器航空觀測載台及高尺度的太空觀測載台已成為趨勢，而所附掛酬載的感測器從早期多光譜的寬頻感測器、多光譜的窄頻感測器直到最近的連續性光譜的窄頻感測器。由多光譜(multispectral)邁入高光譜(hyperspectral)，象徵著感測儀器的精緻發展，也同時反應了光譜解析力與幾何解析力的大幅進步。由“公尺級”跨向至“公分級”時間再現性由“數天”縮短至“每天”，使得各種日常運轉需求得以成真。

以水稻生產上的多元應用為例，本文僅介紹其中五種。

1.水稻品種辨識：不同的水稻品種，由於植體色素、生理代謝、外觀形態、生育天數及營養需求等的諸多差異，可預見將會反應在生育期間的植被反射光譜變化中，這即是利用光譜辨識水稻品

種之理論基礎。經由水稻品種間的光譜辨識技術，將可建立各稻種地理分佈圖，估算個別稻種的栽培面積，並進一步估測期作或年度生產量。

2.水稻生長追蹤：針對作物生長的追蹤，可由對生長性狀的逐時(日)估測表示，如葉面積指數(LAI)與地上部重量等皆為常用生長參數。光譜遙測常用的方法包括利用窄波段的性狀專一性、光譜指數及多光譜特徵模式等，篩檢出與特定生長性狀關係密切的光譜特徵後建立模式，利用於定時的量測。

3.稻株氮營養狀況估測：稻株植體營養狀況的評估係栽培管理中的重要一環，其中以肥料三要素氮、磷、鉀肥的需求量較高，尤其氮肥更是決定生長與產量最關鍵的營養元素。植體氮素含量不足固然不利於生產，施用過高的氮肥卻易使植株倒伏且易受病蟲侵襲，同時造成環境污染並增加生產成本。由於氮素在植體中的高百分比，氮素含量的高低可以反應在植被光譜的異動，於是將相關的光譜特徵篩檢出後即可建構關係模式(組)。以此來追蹤稻株生育過程中的含氮狀態，便可估算稻田各定點應當施用的氮肥量，達到氮肥精準管理的目的。

4.稻株病蟲害感染等級評估：國內稻作病害以稻熱病、白葉枯病及紋枯病最常發生。而最主要的蟲害則以褐飛蝨及瘤野螟長期受到關注。上述這些病蟲源感染稻株之後，將會引起稻株顏色、含水量及外觀形態等的顯著改變，因此亦會反應於植被反射光譜。經由相關光譜特徵的篩檢及特徵光譜模式(組)的建立，即可利用於評估病蟲感染隨時空的變化，來進行病蟲害的監測與精準管理。

5.稻株水分含量推估：稻株植體水分含量的多寡，將會影響生理生化代謝功能。當植體發生缺水時，視情節輕重植株外觀形態會有不等的變化，從生長抑制到組織部位枯乾、植體萎凋甚至全株死亡，而且將會逐漸改變色素濃度、組成與含量。這些均將呈現於植被反射光譜曲線變異之中，亦可因此篩檢出相關光譜特徵與建立特徵光譜模式(組)，進而利用於稻株含水狀態的估測及乾旱等級的評估。由於植體水分尚具有調節體溫的功能，也影響氣孔的啟閉及蒸散作用的是否順暢，因此光譜遙測技術常搭配熱紅外線測溫技術(系統)共同使用，以更精確估測植體溫度及水分含量狀態。

五、結語

輻射光譜遙測技術可應用的層面非常廣泛，經由上述的介紹，即可瞭解此一技術在農作生產流程中的可能利用面向，甚至於逆境管理與災害監測等。欲增廣此一技術在農耕上的多元應用，必先要建構豐富的光譜資料庫及對應的特徵光譜模式(組)，再依照選用的操作遙測載台結合立體遙測資訊構建作業系統，從事於例行的運轉或特定的任務。在平常的農耕運作上，可以藉以進行各種目的精準管理，減少資材浪費、減輕環境衝污染、緩和生態破壞及增加農作收益等。而在逆境與災害發生的情境下，則可以提供災情即時評估、災損發展監測及後續復建追蹤考核。國內目前已擁有高時間與高空間解析力的福衛二號資源衛星，市場上亦有高光譜解析力的資源衛星資料可供選取及購買，因此輻射光譜遙測的應用已不再僅停留於夢想、空想，而是實實在在可以實施並達成具體目標的理想。